Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol. 24, 2, 223-258 (2019)

STRUCTURAL DAMAGE IN HOUSING AND APARTMENT BUILDINGS LOCATED IN THE SOUTHEAST OF MEXICO DUE TO THE SEPTEMBER 7TH, 2017 TEHUANTEPEC EARTHQUAKE, M_W=8.2

Eber Godínez[1], Arturo Tena[2], Hans Archundia[2], Alonso Gómez[2], Raúl Ruíz[3], José Escamilla[4]

[1] Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Campus-I, Blvd. Belisario Domínguez, km 1081, S/N, Col. Terán, 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. eber.godinez@unach.mx
[2]Profesor, Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200, Ciudad de México, México. atc@correo.azc.uam.mx archundia@correo.azc.uam.mx agb@correo.azc.uam.mx
[3]Profesor, Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Chiapas, Campus-I, Blvd. Belisario Domínguez, km 1081, S/N, Col. Terán, 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. raul.ruiz@unach.mx
[4]Gerente General, Ingenyos, Paraíso, Tabasco, México. josescamc75@hotmail.com

Received: February 2019. Accepted: June 2019

ABSTRACT

Typical observed damage patterns during the September 7th 2017 Tehuantepec earthquake (Mw=8.2) in masonry houses and apartment buildings located in Chiapas and Oaxaca states of Mexico are presented in this paper. The origin, causes, and effects of the observed damage are commented.

Keywords: Housing, masonry, seismic damages, Tehuantepec earthquake, structural irregularity, structural pounding

DAÑOS EN VIVIENDAS LOCALIZADAS EN EL SURESTE DE MÉXICO OCASIONADOS POR EL SISMO DE TEHUANTEPEC DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2017, M_W=8.2

RESUMEN

Se presentan, de forma sintética, algunos de los daños característicos observados en estructuras de mampostería destinadas a vivienda, localizadas en los estados de Chiapas y Oaxaca, en el sureste de México, generados como consecuencia del terremoto ocurrido el día 7 de septiembre de 2017 de magnitud 8.2 en el Golfo de Tehuantepec, a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas, México. Se comenta sobre el origen, las causas y consecuencias de los daños observados.

Palabras clave: Vivienda, mampostería, daños por sismo, sismo de Tehuantepec, irregularidad estructural, choque estructural

1. INTRODUCCIÓN

La República Mexicana se ubica entre cinco placas tectónicas, por lo que está continuamente expuesta a acciones sísmicas de importancia, afectando no solamente las regiones epicentrales, sino zonas urbanas que pueden encontrarse a distancias considerables, como en el caso de los sismos que se generan en las costas de Guerrero y pueden afectar la zona centro del país.

Por lo anterior, varias regiones de México se ubican es zonas de alto peligro sísmico. Tal es el caso de los estados de Chiapas y Oaxaca, dos de los estados con mayor actividad sísmica en todo el país y, donde históricamente han ocurrido daños de importancia en la infraestructura debidos a acciones sísmicas de mediana y gran magnitud (Núñez y Ponce 1989, Montero 2010, González *et al.* 2013, González *et al.* 2014).

A pesar del constante peligro sísmico a que se encuentra expuesto México, desde 1900 hasta agosto de 2017 se habían registrado únicamente cuatro eventos sísmicos con magnitud igual o superior a 8.0 (figura 1). Sin embargo, el 7 de septiembre del 2017, a las 23:49:17 horas (04:49 UTM), ocurrió un terremoto de magnitud 8.2, localizado en el Golfo de Tehuantepec (indicado mediante la marca de explosión roja en la figura 1), a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas (SSN 2017).

De acuerdo con lo reportado por la empresa ERN (ERN 2017), este sismo ocurrió en una zona donde no se habían observado sismos desde principios del siglo XX (más de 120 años) y se sintió en el sur y centro del país, resultando afectados los estados de Chiapas, Oaxaca, Tabasco y la Ciudad de México (figura 1).

En este artículo se presentan algunos casos representativos de los diferentes tipos de daño observados en viviendas unifamiliares y edificios de departamentos construidos con base en mampostería (en sus diferentes modalidades), como consecuencia del terremoto del 7 de septiembre. La información reportada es producto del trabajo realizado en diferentes localidades de los estados de Chiapas y Oaxaca (figura 1) por el grupo de reconocimiento de daños del Área de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A) y unos colaboradores de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) y la práctica profesional (Ingenyos), así como información extra recabada por el primer autor.

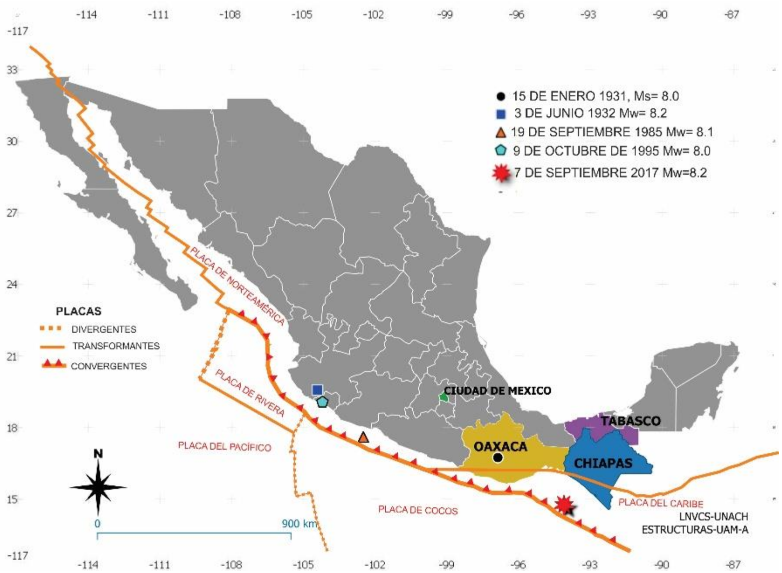


Figura 1 Estados de México con mayores afectaciones durante el sismo de Tehuantepec (M_W=8.2) y localización de epicentros de los sismos de magnitud mayor o igual que 8.0 que han ocurrido en territorio mexicano entre los años 1900 a 2018.

2. SISMICIDAD EN CHIAPAS Y OAXACA, MÉXICO

México se ubica entre las placas tectónicas del Pacífico, Caribe, Cocos, Rivera y Norteamericana (figura 1). Los estados de Chiapas y Oaxaca son de los estados sísmicamente más activos en México, y su actividad se genera por la interacción de tres placas tectónicas: la placa de Cocos, la placa Norteamericana y la placa del Caribe. La placa de Cocos se subduce bajo la de Norteamericana, y en el contacto entre la placa Norteamericana y la del Caribe se desarrolla un desplazamiento lateral izquierdo.

Como lo comentan Juárez *et al.* (2012), la actividad sísmica en el sureste de México, entre las longitudes -94º a -104º oeste, es principalmente resultado de los eventos que suceden en la zona subducción ubicada a lo largo de la trinchera mexicana, donde la placa de Cocos se desplaza por debajo de la placa Norteamericana en su parte más meridional. La velocidad del desplazamiento entre placas varía desde 5.5 cm/año (-104º Oeste) a 7.7 cm/año (- 94º Oeste). Esta zona de subducción se encuentra segmentada, teniendo dos formas principales de desplazamiento, es decir, algunos segmentos se deforman mediante numerosos terremotos de magnitud pequeña e intervalos de recurrencia cortos, mientras que los otros se mueven principalmente con grandes sismos con periodos de retorno mayores de 75 años.

Los sismos en Chiapas tienen su origen en cinco fuentes sismogénicas (Mora *et al.* 2013):

a) La primera es la resultante del proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana, misma que da origen a sismos de gran magnitud (M>7.0).

b) La segunda está constituida por la deformación interna de la placa subducida, lo cual produce sismos profundos o de mediana profundidad (desde 80 hasta 300 km), como el sismo de Villaflores del 21 de octubre de 1995, cuya magnitud fue de 7.2, con una profundidad focal de 165 km y un área de ruptura de 30x10 km. La profundidad de subducción de la placa de Cocos en la costa del estado de Chiapas es mayor que en las costas de Oaxaca, Guerrero y Michoacán. En Chiapas se alcanzan valores cercanos a los 200 km.

c) La tercera corresponde a la deformación cortical asociada a sistemas de fallas superficiales. Existen al menos 15 fallas importantes en el estado que originan temblores de pequeña profundidad (menores a 40 km). Los sismos originados por estas fallas son de magnitud moderada y provocan daños locales. No obstante lo anterior, un grupo importante de la sismicidad cortical de la región se atribuye a la construcción de las presas a finales de los años setenta y a su llenado, por el incremento de la presión de poro.

d) La cuarta está constituida por la presencia de los volcanes activos en el estado de Chiapas, el Complejo Volcánico Tacaná y el volcán El Chichonal.

e) La quinta está relacionada con el contacto tectónico entre las placas Norteamericana y del Caribe, que es una falla lateral izquierda.

En la Tabla 1 se resumen algunos de los eventos sísmicos (posteriores a 1900) que han producido daños en la infraestructura del estado de Chiapas.

Tabla 1 Principales sismos que han afectado a Chiapas (Burguete y Estrada 2017).

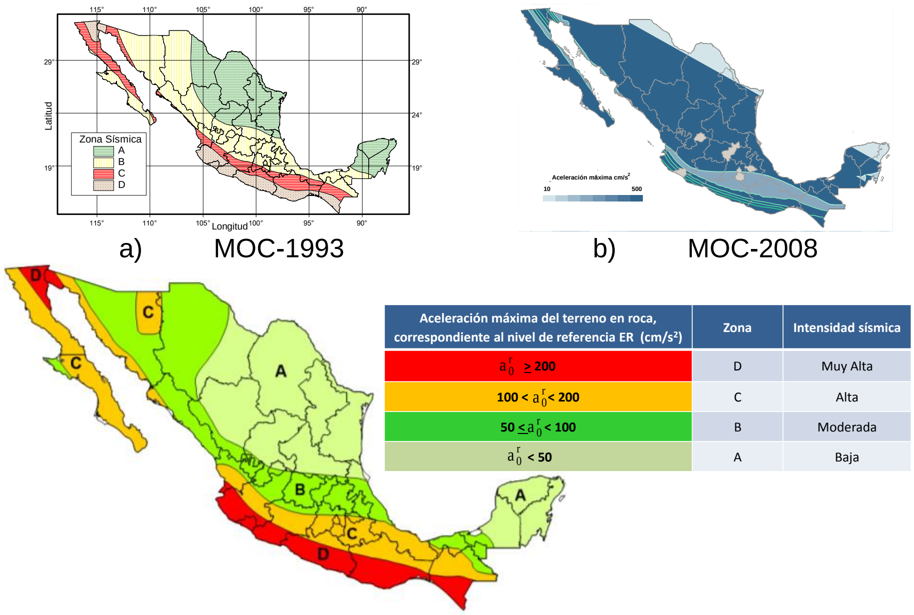
Fecha (Día/Mes/Año)	Magnitud	Intensidad	Zonas Afectadas
23-09-1902	7.7	X	Tuxtla Gutiérrez
15-10-1975	6.1		El Amatal, Chiapa de Corzo y Cupía
20-10-1995	7.2	VII	Nuevo México, Jesús María Garza, Benito Juárez, Villaflores, Jiquipilas, Cintalapa y Tuxtla Gutiérrez
16-01-2002	6.7	VII	Arriaga, San Cristóbal de las Casas, Tapachula y Tuxtla Gutiérrez
7-04-2011	6.7	VI	Tuxtla Gutiérrez

En lo que respecta al estado de Oaxaca, éste se ubica también en una zona de alta sismicidad, donde la actividad sísmica se clasifica en tres diferentes tipos (Montero 2010):

a) Actividad sísmica superficial. Se genera en la zona de subducción de las placas de Cocos y Norteamérica, en una franja aproximada de 80 km a todo lo largo de la costa. Los eventos generados tienen un mecanismo focal de falla inversa, epicentro en la costa y su profundidad promedio es de 16 km. Algunos de los sismos más importantes que han ocurrido son Huatulco 1965 (M=7.8), Pinotepa 1968 (M=7.4), Pochutla 1978 (M=7.8), Ometepec 1982 (M=7), Ometepec 1995 (M=7), Puerto Escondido 1999 (M= 7.4) y Ometepec 2012 (M_w=7.4).
b) Actividad sísmica intermedia. Se debe a un proceso gravitacional asociado con la ruptura de la placa de Cocos, con epicentros al sur de la ciudad de Oaxaca, y que genera eventos a profundidades entre 25 y 40 km. Estos sismos han alcanzado magnitudes considerables, como los del 15 de enero de 1931 (M_s=8.0) y del 30 de septiembre de 1999 (M=7.5).
c) Actividad sísmica profunda. Es ocasionada por un proceso gravitacional conocido como mecanismo de falla normal. Tienen lugar en la placa subducente, con epicentros en el interior del continente, al norte de la ciudad de Oaxaca y a una profundidad de 65 a 115 km. Algunos de los eventos ocurridos en esta zona son: 10 de febrero de 1928 (M=6.7), 26 de julio de 1937 (M=7.3), 11 de octubre de 1945 (M=6.5), 25 de mayo de 1959 (M=6.8), 28 de agosto de 1973 (M=7.3), 24 de octubre de 1980 (M=7.1) y 15 de junio de 1999 (M=7).

El estado de Oaxaca se divide a su vez en ocho zonas sísmicas: 1) Zona Mixteca Media, 2) Zona Huajuapan, 3) Zona Norte y Cañada, 4) Zona Istmo, 5) Zona Mixe, 6) Zona Valle, 7) Zona Puerto Escondido-Huatulco, 8) Zona Pinotepa Nacional-Jamiltepec. Las principales características de cada zona se describen con detalle en Núñez y Ponce (1989).

El peligro sísmico de los estados de Chiapas y Oaxaca se refleja claramente en la regionalización sísmica propuesta originalmente por Esteva (1970) y que se encuentra disponible en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad desde hace décadas (MOC-93 1993), con sus respectivas actualizaciones (MOC-08 2009, MOC-15 2015). Como se observa de la figura 2, en la versión de 1993, en el MOC se considera que en los estados de Chiapas y Oaxaca están ubicados en las zonas B, C y D; sin embargo, en la versión del 2015 hubieron cambios, los cuales pueden verse claramente, pues al igual que en la versión de 1993, en la versión del MOC de 2015 se retoma el concepto de regionalización sísmica, basada en un criterio que depende de los valores de aceleración en terreno rocoso, a_0^r, MOC-15 2015. Se observa que en el MOC-15 todo el territorio del estado de Oaxaca se encuentra considerado dentro de las zonas C y D (alta y muy alta intensidad sísmica). Asimismo, las zonas de alta y muy alta intensidad sísmica en Chiapas se ampliaron, quedando únicamente una pequeña región dentro de la zona de peligro sísmico moderado (zona B). Lo anterior, se debe a que en el MOC-15, basados en estudios recientes, se incluyen nuevas fuentes sísmicas. Un caso puntual, por ejemplo, radica en un ajuste en la geometría de las fuentes sísmicas en Chiapas (regiones de sismos intraplaca de Chiapas).



Aceleración máxima del terreno en roca, correspondiente al nivel de referencia ER (cm/s²)	Zona	Intensidad sísmica
$a_0^r \geq 200$	D	Muy Alta
$100 < a_0^r < 200$	C	Alta
$50 \leq a_0^r < 100$	B	Moderada
$a_0^r < 50$	A	Baja

c) MOC-2015

Figura 2 Evolución de la consideración del peligro sísmico en México de acuerdo con el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (Ilustraciones cortesía: Dr. Luis Eduardo Pérez Rocha).

3. CARACTERÍSTICAS DEL SISMO DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2017

De acuerdo con la información del Servicio Sismológico Nacional (SSN 2017), el terremoto del día 7 de septiembre de 2017 ocurrió a las 23:49:17 horas (04:49 UTM), tuvo una magnitud de 8.2 y se localizó en el Golfo de Tehuantepec, a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas. El sismo se sintió en el sur y centro del país (figura 1). Las coordenadas del epicentro son 14.761º latitud N y -94.103º longitud W y la profundidad es de 45.9 km. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) ubicó las coordenadas del epicentro con una ligera diferencia: 15.022°N y 93.899°W, con una profundidad de 47.4 km. En la figura 3 se muestra la ubicación del epicentro, así como mapas de intensidades asociadas al evento. Como se observa, las intensidades máximas se encuentran en la región del Golfo de Tehuantepec, por lo que las ciudades costeras en esa región fueron las más afectadas por el sismo.

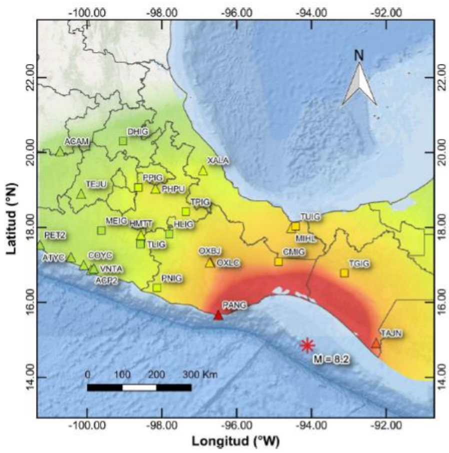
El mecanismo focal del sismo indicó una falla de tipo normal (rumbo = 311º, echado = 84.4º, desplazamiento = -94.7º), la cual es característica de un sismo intraplaca. En esta región, la placa de Cocos se subduce por debajo de la placa de Norteamérica y Caribe (SSN 2017).



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL.(cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II–III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based upon Worden et al. (2012)

a) Epicentro e isosistas calculado por el USGS (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ahv0/map)



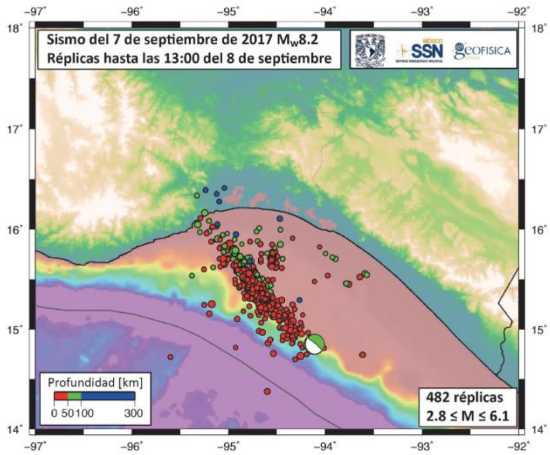
PGA (cm/s^2)	<1	2	4	11	30	90	110	130	>150
Percepción del movimiento	Leve			Moderado			Fuerte		

b) Mapa de intensidad de la aceleración máxima del suelo (PGA) elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (“Instituto” 2017)

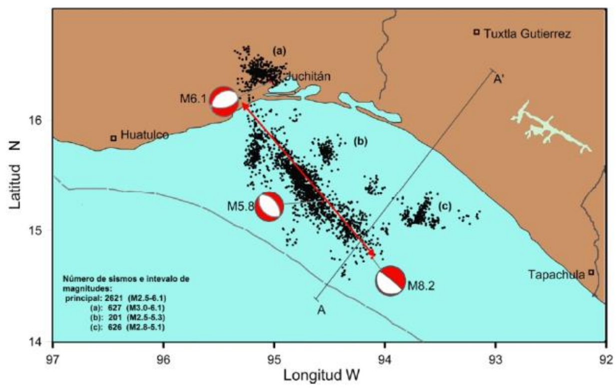
Figura 3 Epicentro y mapas de intensidades del sismo del 7 de septiembre de 2017.

De acuerdo con la información del Servicio Sismológico Nacional (SSS 2017), el evento tuvo un gran número de réplicas. Dos días después de ocurrido el sismo, se habían registrado 482 réplicas (figura 4a) y quince días después, 4326 réplicas, cuya distribución abarca todo el Golfo de Tehuantepec (esta cantidad incluye toda la sismicidad detectada en la región). Se detectaron 4737 réplicas en total. En la Figura 4b se muestran dos réplicas mayores. La primera, de magnitud 5.8, ocurrió el 8 de septiembre a las 00:24 horas y se localizó a 72 km al sureste de Salina Cruz. La segunda réplica, de magnitud 6.1, ocurrió el día 23 de septiembre a las 07:52 horas en las cercanías de

Unión Hidalgo, Oaxaca. La línea roja indica la longitud de la falla correspondiente al sismo principal (230 km aproximadamente).



a) Hasta las 13:00 hrs. del día 8 de septiembre de 2017



b) Hasta el mes de noviembre de 2017

Figura 4 Réplicas reportadas por el Servicio Sismológico Nacional (SSN 2017).

En la figura 5 se muestran las tres componentes de movimiento de algunos acelerogramas registrados, así como sus correspondientes espectros de respuesta elásticos (para 5% de amortiguamiento crítico). Los registros acelerográficos mostrados han sido producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En la figura 5 debe notarse que, con la finalidad de apreciar de mejor manera las gráficas, se consideran escalas independientes para la graficación de los resultados de cada estación. La aceleración máxima, del orden de 500 cm/s^2, se registró en la estación Niltepec (NILT, fig. 5a), ubicada en roca, en el colegio de bachilleres de Niltepec, a 30 km de la ventosa, Oaxaca y a una distancia epicentral de 197 km. Se observa claramente que en los casos mostrados, los valores espectrales máximos están asociados a periodos de vibración bajos. Por ejemplo, para la estación Niltepec, los periodos asociados a los valores máximos espectrales (que son

bastante elevados) están por debajo de los 0.2 segundos, por lo que las estructuras de pocos niveles y rígidas (como las viviendas y edificios de pocos niveles) se vieron sometidas a grandes niveles de aceleración en esta zona.

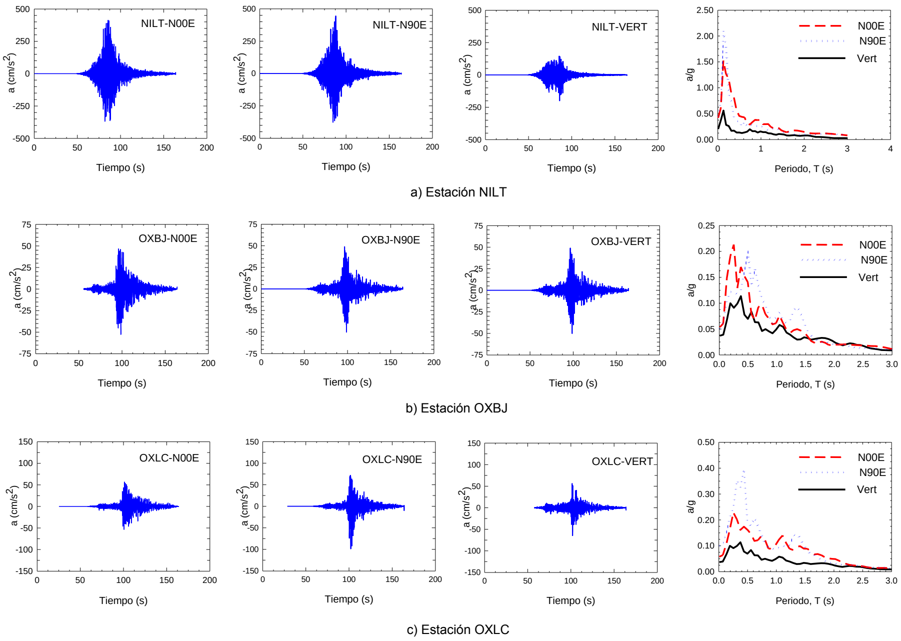


Figura 5 Registros de aceleración y sus respectivos espectros de respuesta elásticos para ζ=5% de estaciones acelerométricas operadas y mantenidas por el grupo de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Además de los daños presentados en la sección posterior, como consecuencia del sismo, se presentaron diferentes afectaciones, tales como deslaves en laderas en varios puntos de las carreteras que comunican las ciudades recorridas (figura 6).

4. DAÑOS EN VIVIENDAS DEBIDOS AL SISMO DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2017

En esta sección se presentan casos representativos de los diferentes tipos de daño observados en viviendas durante el recorrido realizado por los estados de Chiapas y Oaxaca (figura 7). Las localidades recorridas (y de las que se cuenta con información) fueron: San Cristóbal de las Casas, Tuxtla Gutiérrez, Berriozábal, Cintalapa, Pijijiapan, Tapachula, Jesús María Garza, Villaflores, Tonalá, Santo Domingo Tehuantepec, Salina Cruz, Matías Romero Avendaño, Juchitán de Zaragoza, así como puntos intermedios entre dichas localidades (figura 7). Los círculos que se indican en la figura 7 se graficaron como referencia, y tienen un radio, medido desde el epicentro, que va de los 50 km. a los 350 km., con incrementos constantes de 50 km. cada uno.

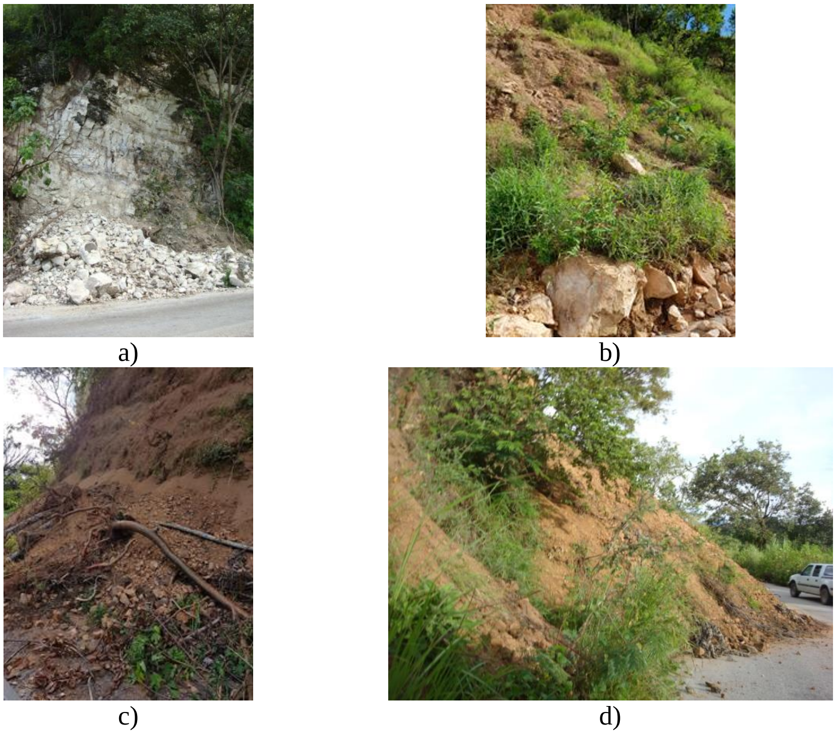


Figura 6 Deslaves en laderas de las carreteras que conectan a Tuxtla Gutiérrez y Guadalupe Victoria y a Villaflores y Tonalá (b, c, d), Chiapas.

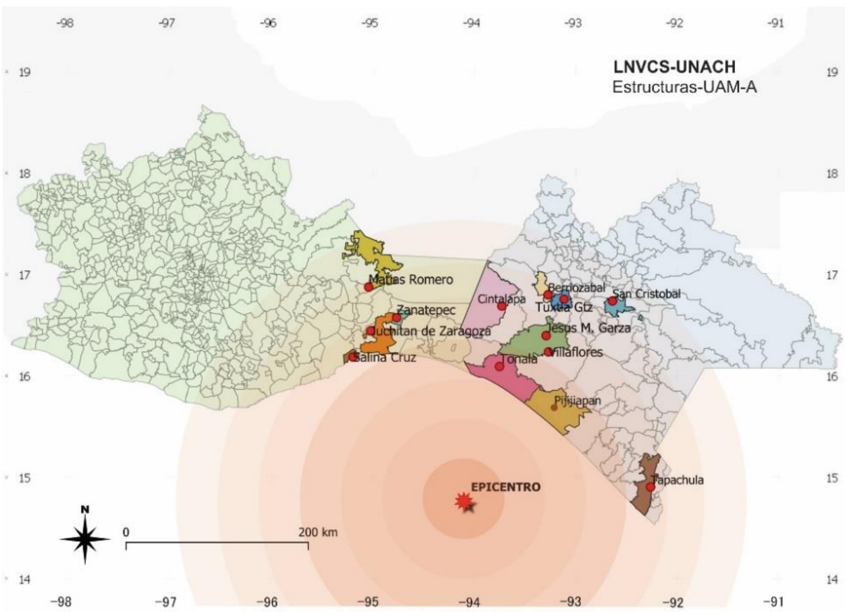


Figura 7 Localización geográfica de las localidades en que se realizaron recorridos.

Como se sabe, gran parte del inventario de la vivienda en México, tanto en las ciudades como en el medio rural, está construido empleando sistemas con base en mampostería en sus diferentes modalidades: simple, confinada o reforzada interiormente.

En Latinoamérica un porcentaje elevado de las viviendas se construye mediante procesos de autoconstrucción, lo que, en general, incrementa la vulnerabilidad de las viviendas, pues a pesar de realizar una inversión considerable, al no contar con asesoría técnica especializada, no se hace un uso eficiente de los recursos. La alta vulnerabilidad de las viviendas de México, asociado al peligro sísmico de las diferentes regiones de país (figura 2), conllevan a que exista un riesgo sísmico elevado, lo cual se evidencía ante eventos sísmicos de gran magnitud, como el ocurrido el 7 de septiembre de 2017.

4.1. Casas de adobe y de mampostería simple

En las figuras 8 a 13 se muestra el tipo de daño característico observado en las viviendas de adobe y de mampostería simple. Es importante mencionar que los daños observados en todas las viviendas de adobe y mampostería simple no difieren de los observados en sismos anteriores en México en otras partes del mundo (por ejemplo, Alcocer *et al.* 1997, Sordo *et al.* 1997, Juárez *et al.* 1999, Blondet *et al*. 2003, Tena 2004, Reyes *et al.* 2006, Flores 2008, Rangel *et al.* 2011, Juárez *et al*. 2012, Tena *et al.* 2014, Varum *et al.* 2014).

Como se observa de las figuras 8 a 13, uno de los aspectos que afecta directamente el comportamiento sísmico de las viviendas de adobe y/o mampostería simple (aun siendo muy pequeñas y de forma simple), radica en que éstas no cuentan con elementos estructurales adecuados para resistir las fuerzas laterales, o cuentan con ellos, pero dispuestos de forma errónea. En la mayoría de los casos, no existen elementos de confinamiento que liguen a los diferentes muros entre sí o protejan adecuadamente las aberturas de puertas y ventanas.

De las figuras 8a-b se observan grietas verticales en las esquinas de los muros, así como volteo de los mismos fuera de su plano. Como se comentó, el daño observado en este tipo de viviendas se debe a la falta de continuidad en el sistema que debe resistir las fuerzas gravitacionales y sísmicas, a la falta de elementos confinantes (dalas y castillos), y a los momentos de volteo fuera del plano que inducen los sistemas de piso flexibles o falta de un diafragma formal por el uso de techos simplemente apoyados en muros comúnmente empleados en estas viviendas (formados usualmente con madera y teja o lámina). Las grietas verticales observadas, que se propagan hacia abajo (figura 8a-b), se deben, en general, al movimiento fuera del plano de los muros (que vibran de forma independiente). Esta grieta vertical origina que el muro quede suelto, sin nada que limite su desplazamiento en sentido perpendicular a su plano (únicamente de forma limitada por el sistema de techumbre ligero), lo que a la postre origina su colapso fuera del plano (figuras

9 a 11), acompañado, en algunas ocasiones, de la caída de la techumbre por falta de apoyo.



Figura 8 Daños típicos en viviendas de adobe y de mampostería simple en la comunidad Jesús M. Garza (a-c) y en las ciudades de Cintalapa (d), Pijijiapan (e) y Tehuantepec (f).

Se observaron además agrietamientos causadas por la acción de tensión diagonal en el plano de los muros, los cuales se presentan usualmente en las esquinas superiores o inferiores de las aberturas de puertas y ventanas.

Las grietas se extienden diagonalmente hacia la parte superior o inferior del muro, y se deben al mal o carente confinamiento de dichas aberturas, pues precisamente en esas zonas es donde se desarrolla el plano de tensión diagonal.



Figura 9 Daños por tensión diagonal y colapsos fuera del plano en muros de adobe y mampostería simple de viviendas en: Jesús M. Garza (a), San Cristóbal de la Casas (b), Colonia Rincón viejo de Matías Romero (c), Pijijiapan (d y e), Tonalá (f) y Villaflores (g).

Una práctica constructiva asociada a este tipo de daño (que aún se usa en la construcción tanto de viviendas en zonas rurales como de la ciudad) radica en que para dar lugar a las aberturas de puertas y ventanas, se colocan únicamente dinteles de madera, cuya función es básicamente dar lugar a dichas aberturas (figuras 8c-e). En las construcciones urbanas, en vez de un elemento de madera, se emplea un elemento de concreto reforzado (“dala”); sin embargo, al igual que en el caso anterior, el elemento está aislado en su totalidad, y su acero de refuerzo no se ancla o liga con ningún otro elemento de la estructura, por lo que no representa un confinamiento real. En la figura 9b se ilustra la poca importancia que los propietarios de algunos inmuebles dieron a los daños causados por el sismo. Se observa únicamente la aplicación de una estrategia de corrección estética del aplanado en los muros de fachada.


a)


b)


c)


d)


e)


f)

Figura 10 Algunos de los colapsos fuera del plano en muros de adobe o mampostería simple en Juchitán, Oaxaca.

Todas las viviendas de adobe o mampostería simple con diafragmas flexible o sin diafragmas, son muy vulnerables a que sus muros fallen fuera del

plano (Tena 2010), no importando dónde se encuentren ubicadas en la calle (figura 9). Sin embargo, sí son más vulnerables cuando se encuentran ubicadas en esquina, debido a la excentricidad torsional y a la flexibilidad lateral de las fachadas abiertas. Esto se constató nuevamente en Juchitán, Oaxaca, no importado que las viviendas sean de una construcción modesta (figuras 10a-e), o cuenten con una construcción colonial de calidad (figuras 10f y 11a-b). En estos dos últimos casos se aprecia claramente el impacto que tuvo la flexibilidad del diafragma flexible, compuesto por sistemas de piso de madera.



a)

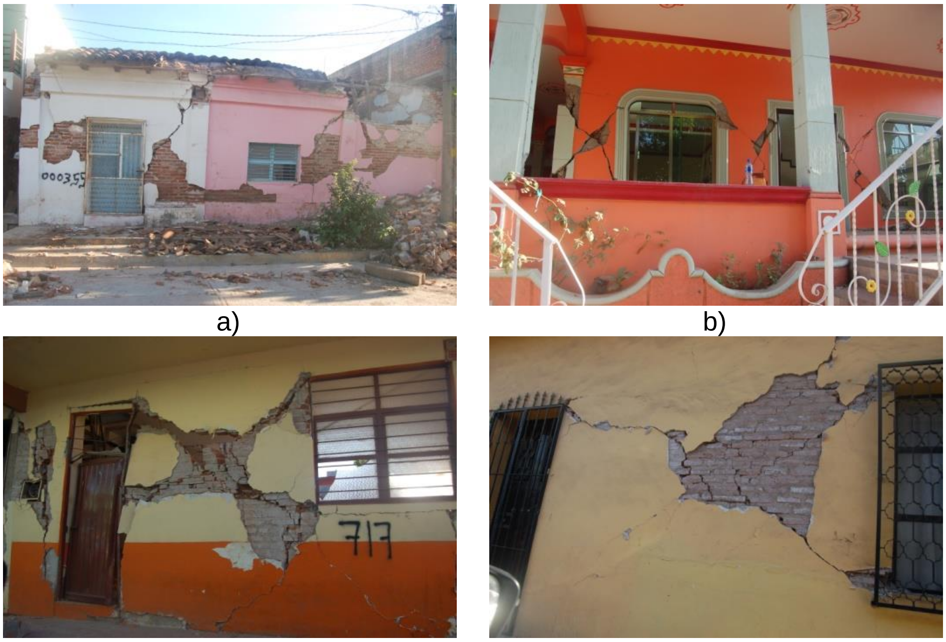


b)

Figura 11 Colapso parcial fuera del plano de muros adosados de mampostería de ladrillo simple en una casona colonial ubicada en Juchitán, Oaxaca.

Cabe señalar que no en todos los casos en que las viviendas de mampostería simple contaban con sistemas de piso simplemente apoyados, se presentaron los daños más importantes fuera del plano de los muros exclusivamente, sino que en muchas ocasiones estaban acompañados de severos agrietamientos por tensión diagonal en el plano de los muros (figura 12a). Por supuesto, la grietas severas por tensión diagonal se presentaron en muchos muros entre vanos, ya fueran esbeltos (figura 12b) o relativamente robustos (figuras 12c-d).

En la figura 13 se muestra una vivienda de dos niveles ubicada en la ciudad de Tonalá, Chiapas. Previo al sismo del 7 de septiembre, era difícil identificar que el sistema constructivo empleado se basa en el uso de mampostería simple. En este caso, el sistema de piso es rígido, compuesto por losas de concreto reforzado. La energía impuesta a la estructura por el movimiento del terreno ocasionó que, al comprimirse, los muros fallaran de forma frágil (literalmente estallaron), tal y como lo atestiguó el propietario, que nos informó que precisamente, durante el sismo, salió cargando a su hija por el muro que explotó en planta baja, y que se observa en la Figura 13b. Como se observa, el tipo de daño es consistente en los muros exteriores e interiores de la vivienda. Por las características de la vivienda y el nivel de daño, se procedería a su demolición. Las imágenes mostradas en la figura 13 muestran claramente la alta vulnerabilidad sísmica de este tipo de sistemas constructivos.



a) b) c) d)

Figura 12 Daños por tensión diagonal en el plano de mampostería de ladrillo simple en viviendas de Juchitán, Oaxaca.



a) Fachada principal b) Vista interior del muro de fachada

Figura 13 Daños en vivienda de mampostería simple ubicada en la ciudad de Tonalá, Chiapas.

Durante este sismo, se registraron muchos colapsos de viviendas de adobe y de mampostería simple, ocasionando pérdidas humanas y materiales, siendo Juchitán, Oaxaca, una de las ciudades más fuertemente azotadas por el sismo del 7 de septiembre de 2017.

4.2. Casas de mampostería confinada

En México se emplea ampliamente la mampostería confinada; sin embargo, es muy común que el confinamiento provisto sea deficiente e insuficiente, dado que frecuentemente no se confinan: a) los vanos de puertas o ventanas, b) las mochetas o muretes esbeltos, empleados frecuentemente en cocinas y recámaras y, c) pretiles y parapetos. En ocasiones, la separación entre castillos es excesiva o se prescinde del empleo de dalas o cerramientos. Esto no sucede exclusivamente en vivienda de autoconstrucción, sino en vivienda asistida por arquitectos o ingenieros, como se ilustrará a continuación.

Un caso particularmente interesante se presentó en Pijijiapan, Chiapas, donde se observó la falla de muros confinados fuera de su plano, como consecuencia de que los muros no contaban con arriostramiento lateral, dado que la vivienda contaba con un techo ligero de madera simplemente apoyado sobre los muros (figura 14). También se aprecia la falta de confinamiento en los vanos de ventana, que es desafortunadamente típica.



Figura 14 Volteo de muro de mampostería deficientemente confinada fuera de su plano por la ausencia de soporte lateral, Pijijiapan, Chiapas.

En la figura 15 se muestra un resumen de daños en varias viviendas (casas) de mampostería deficientemente confinadas ubicadas en Juchitán de Zaragoza, Oaxaca. Se observa que las fallas comunes por tensión diagonal en muros (figuras 15a-d), cuya forma en cruz se debe a la naturaleza reversible del sismo, y a pesar de contar con castillos confinantes, su detallado, materiales de construcción y/o proceso constructivo es deficiente. Errores comúnmente observados son: inadecuada separación de estribos y dobleces de ganchos de los mismos a 90° (reduciendo la efectividad para confinar el núcleo de concreto y dar soporte a las barras longitudinales). En la vivienda mostrada en la figura 15b se observó, además, una evidente falta de adherencia entre la losa de concreto de la planta baja y la dala de desplante de los muros de la segunda planta, así como inadecuada conexión entre los castillos y la losa (la cual es directa, pues no existe una dala de cerramiento). Un caso particularmente interesante es el mostrado en la figura 15d, donde además de la falla por tensión diagonal del murete entre ventanas del segundo piso, dos muros en planta baja casi fallan totalmente fuera de su plano, como

consecuencia de haberse construido como muros diafragma y no haberse restringido su potencial volteo de manera efectiva, conectándolos por medio de ángulos al sistema de piso, como se recomienda, por ejemplo, en las NTCM-04 (2004).



a) b) c) d)

Figura 15 Daños observados en viviendas de mampostería deficientemente confinadas, ocasionados por diferentes errores de diseño/constructivos en Juchitán, Oaxaca.



a) b)

Figura 16 Daños observados en viviendas de mampostería deficientemente confinadas en Matías Romero, Oaxaca.

Los daños por tensión diagonal por confinamientos deficientes se presentaron en otras ciudades donde la intensidad de las fuerzas sísmicas

fueron notablemente menores que en Juchitán, por ejemplo, en Matías Romero, Oaxaca (figura 16). En la figura 16a se aprecia el agrietamiento por tensión diagonal en la vecindad de una abertura de ventana grande sin confinar. En la figura 16b se presente el caso más interesante, donde se aprecia que el agrietamiento en tensión diagonal en planta baja es consecuencia de la ausencia de un castillo que confine la abertura de la puerta, pues paradójicamente, si existe un castillo confinante en esa zona en la puerta del nivel superior, donde no se presentó daño.

En las figuras 17 y 18 se muestran los daños observados en diferentes casas habitación ubicadas las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y Berriozábal, ambas del estado de Chiapas. En este caso, la vivienda mostrada en la figura 17 contaba con un diseño arquitectónico, pero no con un diseño ingenieril. La casa habitación, de tres niveles, presentó daños de consideración en prácticamente todos los muros del segundo nivel, asociado a un inadecuado confinamiento de la mampostería dado que los vanos de puertas y ventanas no estaban delimitados por castillos y dalas (figura 17b). Se observó carencia de elementos de confinamiento, no únicamente en las aberturas de puertas y ventanas, sino también en muros largos, excediendo las recomendaciones normativas para estos casos. Este defecto es común en la vivienda de autoconstrucción, aún la de clase media y media alta (con participación de arquitecto inclusive), como se ha observado en otros sismos en México (por ejemplo, Alcocer *et al.* 1997, Reyes *et al.* 2006, Tena 2011, Tena *et al.* 2014).



a) Fachada posterior



b) Abertura sin confinamiento

Figura 17 Daños por inadecuado confinamiento en casa habitación ubicada en la colonia Terán de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

En las viviendas mostradas en la figura 18 se presentaron daños estructurales graves en los muros de fachada de la planta baja por tensión diagonal. Lo anterior se debe nuevamente al inadecuado/carente confinamiento de las aberturas de vanos, así como al inadecuado detallado de los elementos cortos ubicados en la segunda planta, localizados en las aberturas del cubo de escaleras (figura 18a). De la figura 18b se observa claramente que, debido a la práctica de alojar las instalaciones sanitarias en los elementos estructurales de confinamiento (castillos), se reduce significativamente el área de los mismos, produciendo un pobre desempeño de la mampostería, la cual además, se elabora empleando piezas (en este caso, bloques huecos de concreto) que usualmente no cuentan con control de calidad adecuado (Ruiz y Aguilar 2006).



a) b)

Figura 18 Daños en viviendas ubicadas en la ciudad de Berriozábal, Chiapas.

Con las fotografías mostradas en las figuras 14 a 18 se evidencía una vez más la alta vulnerabilidad sísmica de las viviendas que emplean sistemas estructurales resistentes a sismo mal detallados o concebidos. En general, el uso de procesos de autoconstrucción, sin la asesoría técnica adecuada, conlleva a viviendas sísmicamente vulnerables.

Las viviendas construidas empleando procesos de autoconstrucción son generalmente más vulnerables que aquéllas en que sí se realiza una planeación, diseño integral (arquitectónico, estructural, instalaciones) y supervisión técnica. Esto se cumple siempre que se garantice la aplicación adecuada de todos esos rubros. Sin embargo, cuando el diseño y/o la supervisión son deficientes, también se pueden presentar daños muy graves en estructuras en que hayan participado arquitectos y/o ingenieros.

Un ejemplo claro de esto último se muestra en la figura 19, que corresponde a los daños observados en una vivienda residencial ubicada en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (figura 7). En este caso, en teoría, sí se contaba con un diseño estructural “formal” y supervisión técnica especializada. El severo daño estructural observado (pérdida total) indica claramente la pobre calidad de los materiales de construcción empleados (concretos, morteros, piezas de ladrillo artesanal), la mala calidad de la mano de obra y una inadecuada concepción arquitectónica y estructural. Se observan, entre otras: a) baja densidad de muros en la dirección de la fachada, b) fallas por tensión diagonal en muros, c) fallas por cortante en castillos, d) fallas de cortante por deslizamiento (como consecuencia de una falla de adherencia por corte en la junta, producto de la poca adherencia entre las piezas y el mortero, figura 19d), e) pandeo y fractura del acero de refuerzo de elementos de confinamiento (por inadecuado detallado del acero y la pobre calidad del concreto, figura 19b) e, f) inadecuada conexión (falta de adherencia) entre la losa de la planta baja y los muros de segunda planta (figura 19a). Claramente, en este caso, además de lo previamente mencionado, existió negligencia por parte de los encargados de la ejecución, supervisión y revisión de la obra. En este fraccionamiento existieron varias viviendas con daño estructural muy grave similar al mostrado en la figura 19.



a) Fachada principal



b) Muro interior



c) Zona de escaleras



d) Vista lateral

Figura 19 Daño estructural muy grave en vivienda residencial ubicada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (fotografías cortesía del Ing. Christian Burguete D'Artote).

4.3. Edificios de vivienda con muros de mampostería

Los malos comportamientos por confinamientos deficientes no ocurrieron exclusivamente en casas habitación, sino también en edificios de departamentos.

En la figura 20 se ilustra el caso de un edificio de departamentos de cuatro niveles en que todas las ventanas del muro de fachada no cuentan con adecuado confinamiento. Además, el inadecuado diseño y/o construcción del pretil ocasionó su colapso, afectando a la construcción vecina de menor altura. El edificio también tiene una estructuración propensa a desarrollar un piso suave o débil, el cual afortunadamente no se presentó.

En la figura 21 se presentan dos edificios de departamentos de cuatro niveles ubicados en Juchitán, Oaxaca. En el edificio mostrado en la figura 21a es muy apreciable la falla de los muros de mampostería por la falta de un confinamiento adecuado. Sin embargo, esto muy probablemente fue consecuencia de lo siguiente. Se aprecia que la planta baja es muy abierta, sin muros por albergar a los locales comerciales, por lo cual el edificio tiene una estructuración para desarrollar un potencial piso suave y débil. Sin embargo, éste piso débil no se desarrolló debido a que, muy probablemente, antes el edificio experimentó un choque estructural con la casa a su derecha en el segundo nivel, y este impacto, que afortunadamente fue directamente entre los sistemas de piso de ambos inmuebles, propició la falla de estos muros no confinados en el segundo nivel y el agrietamiento severo en el tercer nivel.

El edificio mostrado en la figura 21b presentó un daño más ligero por tensión diagonal en el muro de fachada en el segundo y tercer nivel y en el murete entre ventanas del tercer nivel, ambos ocasionados por el choque estructural con la vivienda de autoconstrucción de dos niveles con accesoria en planta baja que es contigua a su derecha, y que parece ser parte de la misma propiedad.



a) b)

Figura 20 Daños en edificio de departamentos por inadecuado confinamiento ubicada en la colonia Terán de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.



a) b)

Figura 21 Daños en muros de mampostería de edificios de departamentos ubicados en Juchitán, Oaxaca.

En la figura 22 se presenta el daño observado en un edificio de mampostería confinada de cuatro niveles ubicados en Tonalá, Chiapas. Se aprecia claramente que el edificio se ha construido por etapas, donde los dos primeros pisos son los originales, y recientemente se han agregado los últimos dos niveles. Además, es muy evidente la ausencia de confinamiento vertical (castillos) en los vanos de ventanas pues, curiosamente, se dispone de una dala intermedia en la parte superior de las aberturas de ventanas. También se observó un error o modificación constructiva, donde el tamaño de las aberturas de las ventanas a la derecha de las fotografías se redujo de tamaño rellenando con ladrillos parte de ese hueco posteriormente, por lo que existe una junta vertical ante la ausencia de continuidad en el cuatrapeado (figura 22b). A pesar de todas estas deficiencias, el daño explosivo que se observa en el segundo entrepiso fue ocasionado por el choque estructural con la losa de la casa contigua a su izquierda, lo que ocurrió a media altura.



a)



b)

Figura 22 Daños en muros de mampostería de un edificios de departamentos en Tonalá, Chiapas.

4.4. Estructuras que desarrollaron pisos suaves y/o débiles

Es bien conocido que una de las peores condiciones de irregularidad estructural es la conocida como planta baja suave y/o débil (por ejemplo, Moehle y Sozen 1980, “Fundación ICA” 1988, Juárez *et al.* 1999, Tena 2004, Ko y Lee 2006, Guevara 2009, Tena 2010, Tena *et al.* 2014, Hernández y Tena 2016). Este tipo de estructuración, que se emplea frecuentemente en edificios ubicados en zonas urbanas, normalmente se origina por los requerimientos de espacio para alojar el área de estacionamiento, escaparates o accesorias, e incrementa notablemente la vulnerabilidad de una estructura y su correspondiente probabilidad de falla y/o colapso.

En viviendas unifamiliares, normalmente se caracteriza por contar con una densidad de muros muy baja en planta baja respecto a la del segundo nivel (figura 12b), por lo que existe un cambio de rigidez y resistencia abrupto en

elevación. Sin embargo, cabe señalar que el piso suave y débil también puede ocurrir a la inversa, es decir, cuando la planta del segundo nivel o de un nivel intermedio o superior existe un cambio importante de rigidez y resistencia, como es el caso de la vivienda mostrada en la figura 15a.



a) Choque estructural



b) Detalle de eje sin muros



c) Fachada principal



d) Detalle de falla en columna



e)

Figura 23 Daños en viviendas por planta baja débil, Juchitán, Oaxaca.

Además de la vivienda mostrada en la figura 12b, donde el daño mostrado está asociado a un primer piso suave y débil, en la figura 23 se muestra el estado posterior al sismo de otras tres viviendas ubicadas en la ciudad de Juchitán, Oaxaca, donde se aprecian también daños por primer piso suave y débil. Se observa que las viviendas mostradas en las figuras 23a-d son poco redundantes, aspecto que puede contribuir a un inadecuado comportamiento estructural ante acciones sísmicas intensas (Tena y Cortés 2014, Godínez y Tena 2016). Por ejemplo, la estructura mostrada en las figuras 23a-b cuenta únicamente con un "marco" en la dirección de fachada. Aunado a lo anterior, en este caso, existió choque estructural con las dos construcciones vecinas, ocasionando daño tanto en la columna como en el muro perpendicular a la fachada principal. Se observa que la columna en cuestión no cuenta con las dimensiones y detallado adecuados. Además de lo anterior, en esta vivienda, que es esbelta también, pudieron existir efectos de torsión, pues, en planta baja, en uno de los ejes longitudinales de colindancia existen muros, en tanto que en el otro eje de colindancia se cuenta únicamente con columnas (figuras 23a-b). En el caso de la vivienda mostrada en las figuras 23c-d, se observa daño en las columnas de fachada debido a una inadecuada conexión entre las mismas y el resto de la estructura. Como se observa, no se colocó apuntalamiento temporal en las estructuras posterior al sismo.

En la vivienda mostrada en la figura 23e se aprecia, a la distancia, el colapso de los elementos verticales que soportaban a la estructura en planta baja, a la derecha de la fotografía. Lamentablemente, no se pudieron fotografiar detalles, por no permitirse el acceso a este inmueble.

Finalmente, en las figuras 24 y 25 se muestran los colapsos de dos estructura de tres niveles, por la peor combinación de irregularidad estructural posible: edificio en esquina, que desarrollan torsión con piso suave y débil.



a) Fachada principal b) Fachada lateral

Figura 24 Colapso de vivienda en esquina por entrepiso débil en la ciudad de Juchitán, Oaxaca.

En la estructura mostrada en la figura 24 se observa la magnitud de los daños en cada uno de los niveles, siendo el segundo entrepiso el que se colapsó, muy probablemente debido a una distribución y densidad de muros diferente a la del resto de los niveles, ocasionando un problema de entrepiso débil, al igual que en planta, por una mayor densidad de muros en las colindancias que en las fachadas, que ocasionó además respuesta torsionante (figura 24b). Se observa, además, tanto una planta muy alargada como una práctica muy común en las viviendas de varios niveles, la cual radica en que el eje de los muros de la planta alta no coincide con los de planta baja; en este caso, el murete de fachada del último nivel es excéntrico respecto a los del entrepiso inmediato inferior (figuras 24a).



a) b)

c)

Figura 25 Colapso de vivienda en esquina por entrepiso débil en la ciudad de Juchitán, Oaxaca.

En la estructura mostrada en la figura 25 se aprecia que el colapso se presentó en el tercer nivel (último piso), dado que al disponer de dos fachadas muy abiertas (figura 25a), sobre todo en una dirección (figura 25b), más muros en las dos colindancias, la respuesta torsionante y flexible del inmueble fue muy importante, tanto así que se aprecia evidencia de choque con las construcciones vecinas en ambas calles, tanto la casa de dos pisos a su izquierda en la dirección más abierta (figura 25b), como el edificio de tres niveles a su derecha en la calle perpendicular (figura 25c). Muy probablemente el choque que experimentó con ambas estructuras contiguas fue lo que finalmente propició el colapso del último piso, principalmente el choque asimétrico con la casa más chaparra de dos pisos (figura 25b).

4.5. Condiciones de irregularidad estructural y choque estructural

Es común que se enfaticen los daños en viviendas de mampostería atendiendo a que se usan modalidades frágiles y poco resistentes, como el adobe y la mampostería simple, y en mampostería confinada, a deficiencias muy claras en el confinamiento de vanos o errores constructivos. Aunque estos aspectos son importantes de exaltar, también se deben enfatizar los impactos específicos de las condiciones de irregularidad estructural, que en muchas ocasiones se pasan de largo en vivienda, sobre todo en casas habitación. Asimismo, hay que enfatizar lo dañino y peligroso que es el choque entre estructuras contiguas, por carecer de separaciones adecuadas.

Aunque en secciones previas se han discutido algunas de estas condiciones, en esta sección se ampliará la discusión de las que se observaron e ilustran en este trabajo, y su efecto específico.

Escalonamiento. Los escalonamientos entre niveles fomentan momentos torsionantes de importancia entre los niveles donde se presenta el escalonamiento. En este trabajo sólo se presenta una vivienda con escalonamiento, la casa mostrada en la figura 18a.

Esbeltez. las estructuras muy esbeltas son propensas a: a) ser flexibles, b) desarrollar desplazamientos laterales importantes, c) desarrollar momentos P-Δ importantes en sus columnas y, d) generar momentos de volteo importantes, que afectan a los elementos resistentes verticales en planta baja y a su cimentación. En la muestra de estructuras de vivienda que se presenta, existen pocas esbeltas, pues normalmente son casas habitación de pocos niveles. Sin embargo, sí existen algunas con esbelteces que superan la relación altura total entre dimensión menor en planta de 2.5 (H/B=2.5), límite internacional para considerar a una estructura regular en esbeltez. En este sentido, se destacan la casa mostrada en la figura 18a, que además tiene otra condición indeseable: escalonamiento; el edificio de las figuras 22a-b, la casa que desarrolló piso suave (figura 23a), y el edificio que se colapsó y que se muestra en la figura 24a.

Irregularidad en planta. Las irregularidades en planta favorecen la respuesta torsionante y la flexibilidad de diafragma, entre otros aspectos indeseables. De las fotos mostradas, las únicas plantas sensiblemente irregulares son las de la casa colonial de las figuras 11a-b, que era de sección transversal en L con patines alargados y, en este caso, se favoreció la flexibilidad del diafragma, por los sistemas de piso de madera que poseía. En cambio, en el edificio mostrado en la figura 21b se tiene una planta en L con un diafragma rígido, y eso favoreció el giro (torsión) y choque con la construcción vecina. Aunque no se ilustró en las fotografías, el edificio presentado en las figuras 22a-b cuenta con una planta rectangular muy alargada (hacia el fondo), mientras que en el edificio que se colapsó y que se muestra en las figuras 24a-b, se aprecia que contaba con una planta rectangular muy alargada, además de estar en una esquina.

Flexibilidad de diafragma y ausencia de diafragma. Los diafragmas flexibles son causantes de imponer demandas amplificadas fuera del plano no uniformes en muros perpendiculares a ellos, entre muchos otros aspectos indeseables (Tena-Colunga y Abrams 1995 y 1996, Tena 2010). Cuando los sistemas de piso se apoyan simplemente en los muros, no poseen arriostramiento lateral y son propensos al volteo o falla fuera del plano. Los muros sin refuerzo tienen muy poca resistencia a tensión fuera del plano, y por ello fallan o se colapsan. Así, el efecto de diafragma flexible o ausencia de diafragma contribuyó al daño o colapso de los muros fuera del plano de las estructuras de mampostería simple de adobe o ladrillo mostradas en la figuras 8a-c, 8e, 9c-g, 10a-f, 11a-b y 12a, más la estructura con mampostería confinada de la figura 14.

Piso suave y/o débil. Se denomina como piso suave a aquél entrepiso cuya rigidez lateral es considerablemente menor que la del entrepiso inmediatamente superior o inferior. Se define como piso débil a aquél entrepiso cuya resistencia ante carga lateral es considerablemente menor que la del entrepiso inmediatamente superior o inferior. Aunque normalmente estas dos condiciones están íntimamente ligadas y generalmente una estructura con piso suave también tiene piso débil, en ocasiones los pisos débiles no necesariamente están ligados a un piso suave, como ocurre frecuentemente en estructuras con base en muros de mampostería confinada, donde normalmente el daño está ligado al nivel de planta baja. Estas dos condiciones ocasionan demandas de deformación amplificada en los elementos resistentes del entrepiso suave y débil, que normalmente no son capaces de resistir, por lo que se produce daño estructural muy severo e incluso, el colapso de ese entrepiso o el colapso total de la estructura. Por ello, es reconocida como una de las condiciones de irregularidad estructural más indeseables y, entonces, las estructuras que poseen esta debilidad se catalogan como fuertemente irregulares en los reglamentos de diseño sísmico de México. Lo más común es que se presenten pisos suaves y débiles en el primer nivel, pero se pueden presentar en niveles superiores, cuando otras condiciones de irregularidad interactúan también. Por ejemplo, durante este sismo se observaron estructuras de vivienda con potenciales primeros pisos suaves y débiles que no llegaron a desarrollarse por otros factores, como los que se muestran en las estructuras de las figuras 20a-b y 22a-b, en ambos casos, porque el choque estructural modificó las zonas de mayores demandas, redistribuyéndolas a los niveles superiores. Se presentaron casos claros de primeros pisos suaves y débiles, como los mostrados en las figuras 12b y 23a-e. Se desarrolló un segundo piso suave y débil en la casa mostrada en la figura 15a. En las estructuras mostradas en las figuras 24a-b y 25a-c, los pisos suaves y débiles del segundo nivel (figuras 24a-b) y del tercer nivel (25a-c) se deben tanto a esta condición, como al impacto de la respuesta torsionante y también del choque estructural, como ya se discutió en secciones previas.

Construcciones en esquina. Las construcciones en esquina son muy vulnerables, porque normalmente disponen de fachadas (la ele en planta que forman) muy abiertas, en particular en planta baja, por su uso para estacionamiento, locales comerciales y escaparates. En contraste, en las colindancias (que forman la ele opuesta en planta), poseen una enorme rigidez, por el uso masivo de muros y muros diafragma. Esto ocasiona que los centros

de rigideces de los entrepisos no coincidan con sus centros de masa, y se produzcan momentos torsionantes muy fuertes, que si no fueron considerados en el diseño, seguramente llevarán a las estructuras a su daño severo o colapso. Esta es una de las condiciones de irregular estructural más dañinas y peligrosas, como se ha constatado en múltiples sismos, no sólo en México, sino en el mundo. Es por ello que a las estructuras con este tipo de irregularidad estructural combinada (piso suave y torsión) se catalogan como fuertemente irregulares en los reglamentos de diseño sísmico de México. Esta condición se observó en los edificios en esquina de las figuras 10a-b y 15c, pero muy particularmente, en los colapsos mostrados y discutidos en las figuras 24a-b y 25a-c. Existieron otros edificios en esquina presentados en las figuras 10c-e y 11a-b, donde se aprecia que las fachadas no eran tan abiertas, por lo que la excentricidad torsional fue menor, y el daño mostrado ahí se debe más a la flexibilidad de diafragma o ausencia de los diafragma de piso.

Múltiples condiciones de irregularidad estructural: En los reglamentos de diseño sísmico de México se reconoce que las estructuras son más vulnerables ante sismos mientras más condiciones de irregularidad estructural se dispongan. En este sentido, no sorprende que entre las estructuras de vivienda mostradas con daños muy severos en este artículo, se encuentren varias que disponen de más de una condición de irregularidad estructural. Así, se destacan las siguientes estructuras con múltiples irregularidades estructurales: a) con dos, las mostradas en las figuras 15c, 18a, 23a-b y 25a-c, b) con tres, las mostradas en las figuras 10a-e, 11a-b y 22a-b, d) con cuatro, el colapso mostrado en las figuras 24a-b.

Choque estructural. El choque entre estructuras vecinas normalmente se da por separaciones inadecuadas entre ellas, y se magnifica su posibilidad de ocurrencia en función de que las características dinámicas entre estructuras colindantes sean distintas (periodos de vibrar), lo que hace que, en ocasiones, durante el sismo se desplacen en direcciones contrarias que favorecen el choque. La interacción dinámica suelo-estructura debida a rotación o cabeceo de la cimentación magnifica la posibilidad de choque entre estructuras con separaciones inadecuadas. En México existe una mala tradición de décadas en no respetar la separación entre estructuras colindantes, y esta práctica no se ha mejorado en la construcción de estructuras más recientes. Así, no sorprende que entre las causas de daño severo en las estructuras de vivienda mostradas, se encuentre el choque estructural, como se ilustra en las estructuras mostradas en las figuras 10c, 12a, 15a, 20a-b, 21a-b, 22a-b, 23a-d, 24a-b y 25a-c, y son sólo algunos de los muchos casos presentados, tanto en vivienda, como en estructuras para otros usos. Es una tarea pendiente de nuestros reglamentos de construcción: establecer una separación mínima entre estructuras colindantes que sea fácil de aplicar y supervisar por las autoridades que autorizan las nuevas construcciones, y que además sea efectiva para prevenir el choque estructural.

4.6. Efectos de sitio

Gran parte de los daños observados en la ciudad de Juchitán, Oaxaca, además de los problemas de estructuración y/o constructivos mencionados, pueden también haberse debido a la zona en donde se encuentran ubicadas,

pues como se muestra en la figura 26, gran parte del inventario de daños severos se encuentra en las zonas cercanas a las márgenes de un río (río Los Perros), y dado que tanto su cauce pudo haber variado con los años, como al hecho que los suelos en sus márgenes son de por sí de mala calidad por las filtraciones de agua a los costados de su cauce, se obtienen suelos de mala calidad en sus cercanías, y por ende, efectos de sitio desfavorables. Los círculos rojos mostrados en la figura 26 representan no únicamente una estructura con daño, sino en algunos casos, hacen referencia a la localización de varias construcciones dañadas, pues en muchas ocasiones eran contiguas y numerosas.

Cabe señalar que los efectos de sitio por cercanía a márgenes de ríos no sólo se observaron en Juchitán. Por ejemplo, en la ciudad de Tehuantepec también el daño estructural severo se concentró en la zona cercana al río, en el centro de la ciudad (figura 8f), pero afectó de manera importante principalmente a estructuras coloniales e iglesias, que no son el objeto de este trabajo. Seguramente, en muchas otras poblaciones de los estados de Chiapas y Oaxaca se podrán documentar efectos de sitio por suelos blandos cercanos a márgenes de ríos, de lagos, de lagunas y al mar, o a suelos de relleno mal realizados o ganados a vasos de acuíferos (ríos, lagos, lagunas, esteros, mar, etc).



Figura 26 Localización geográfica del daño severo en viviendas y edificios de departamentos en la ciudad de Juchitán, Oaxaca.

5. COMENTARIOS FINALES

Se presentan, de forma sintética, algunos daños característicos observados en estructuras de mampostería destinadas a vivienda localizadas en los estados de Chiapas y Oaxaca (México), generados como consecuencia del terremoto ocurrido el día 7 de septiembre de 2017 de magnitud 8.2.

Gran parte de los daños observados son repetitivos y se deben, en su mayoría, a una mala concepción, inadecuado proceso constructivo, mala calidad de los materiales de construcción, carente supervisión especializada o técnicas constructivas tradicionales inadecuadas. En general, las viviendas unifamiliares carecen de un diseño estructural formal, pues se recurre a procesos de autoconstrucción, empleando mampostería simple o muy deficientemente confinada, con ausencia de elementos confinantes (dalas y castillos) en vanos de puertas y ventanas. También cabe destacar que muchos de estos daños fueron magnificados por condiciones indeseables de irregularidad estructural, entre las que destacaron la flexibilidad de diafragma, los pisos suaves y/ó débiles y la torsión de estructuras en esquina, así como estructuras que simultáneamente poseen varias condiciones de irregularidad estructural. Muchos de los daños presentados también se magnificaron o tienen su origen en el choque estructural entre estructuras vecinas.

Un aspecto de suma importancia, al menos en el sureste de México, radica en que muchos de los diseñadores recurren al empleo de recomendaciones de diseño obsoletas, en las que por ende, la definición del peligro sísmico también lo es. Por esto, en muchos casos las estructuras se diseñan para niveles de aceleración considerablemente inferiores a los que se estipulan en recomendaciones vigentes, los cuales toman en cuenta todo el conocimiento y experiencia adquirido en décadas. Un ejemplo claro radica en el hecho de que aún hay ingenieros, que dentro de sus actividades realizan diseño estructural, que aplican las recomendaciones para diseño sísmico del Manual de Obras Civiles en su versión de 1993, lo cual es muy serio, considerando que la versión más recientes de dicho Manual es de 2015, con cambios sustanciales. Además, un rubro no menos importante radica en el hecho de que en México no existe un reglamento Nacional, sino que cada municipio debe contar con un reglamento específico (el uso del Manual de Obras Civiles no es obligatorio en México para estructuras que no forman parte del sector eléctrico). Por lo anterior, el documento que rige la actividad de los profesionales es el correspondiente Reglamento de Construcciones de la localidad en cuestión, los que en su mayoría presentan definiciones del peligro sísmico sin bases serias y/o arbitrarias.

Además, la definición de las condiciones de irregularidad estructural no están actualizadas, así como la definición de los parámetros requeridos para definir los espectros de diseño sísmico tomando en cuenta la ductilidad, la sobrerresistencia, la redundancia, la interacción suelo-estructura, la irregularidad estructural y el comportamiento degradante (importante en estructuras de mampostería y de concreto reforzado). Lo anterior claramente afecta el comportamiento sísmico esperado en las estructuras diseñadas cuando sean sometidas a fuerzas sísmicas intensas.

Igualmente, y no menos importante, es el hecho de la no enseñanza formal de la mampostería en todos los programas de licenciatura de la carrera de ingeniería civil de las universidades de México, donde salvo honrosas excepciones, no hay cursos 100% dedicados a las estructuras de mampostería. Este ocasiona que el diseño de estas estructuras se haga con poco o nulo conocimiento de cómo analizar a la mampostería, cómo interpretar sus resultados, como diseñarla y cómo detallarla. Lamentablemente, más de uno quiere extrapolar sus conocimientos y práctica del concreto reforzado, lo cual simple y llanamente lleva en muchas ocasiones a tomar decisiones muy desafortunadas desde el punto de vista estructural.

Por ello, es evidente que en México es necesario implantar asignaturas obligatorias en los planes de estudios de las licenciaturas de ingeniería civil enfocadas en el diseño de estructuras de mampostería (actualmente son pocas las universidades que las consideran en su plan de estudios), sistema mayoritariamente empleado en la construcción de viviendas, pues tanto en este como en otros eventos sísmicos, se ha observado un buen comportamiento de las estructuras de mampostería confinada o reforzada cuando están adecuadamente diseñadas y construidas.

La alta vulnerabilidad de las construcciones y la severidad del movimiento sísmico ocasionaron un saldo de 96 personas fallecidas, la mayoría de ellas (76 personas) en Juchitán, Oaxaca. En Oaxaca, 41 municipios resultaron afectados, entre ellos, Juchitán, Matías Romero, Unión Hidalgo, San Dionisio del Mar, y del estado de Chiapas, Tonalá, San Cristóbal de las Casas, Pijijiapan, Cintalapa, Tuxtla Gutiérrez, Berriozábal, Tapachula, así como pequeñas comunidades. También hubo daños en Villahermosa, Tabasco. De acuerdo a la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), 65,044 viviendas sufrieron daños en Oaxaca, de las cuales 26,949 (41%) se consideraron pérdida total. Asimismo, en Chiapas 46,773 viviendas sufrieron daños, de las cuales 14,073 (30%) se consideraron pérdida total. Más de 65,000 personas resultaron afectadas.

La extensión de los daños ocasionados por el sismo del 7 de septiembre de 2017 fue mucho mayor a lo mostrado en este documento, enfocado exclusivamente a los daños en vivienda. Por ejemplo, en las ciudades de San Cristóbal de las Casas en Chiapas y en Juchitán, Tehuantepec y Matías Romero en Oaxaca, se observaron daños de gran magnitud en diversos templos, palacios de gobierno y otras estructuras históricas, representando pérdidas económicas y culturales muy significativas. A la fecha, a más de un año de ocurrido el sismo, en la mayoría de dichos templos aún se están realizando las labores de reconstrucción (en muchos casos apenas comenzando), con avances sumamente lentos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el patrocinio extraordinario de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, que les permitió realizar las visitas de reconocimiento postsísmico en las ciudades y comunidades de los estados de Chiapas y

Oaxaca reportadas en este estudio. Se agradece también al Ing. Christian Burguete D'Artote por permitirnos emplear sus fotos de la vivienda seriamente dañada en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Un agradecimiento especial al Dr. Luis Eduardo Pérez-Rocha por facilitar y permitir el uso de figuras de gran calidad. Los registros de aceleración mostrados corresponden a estaciones acelerométricas operadas y mantenidas por el grupo de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

REFERENCIAS

1. Alcocer, S. M., Tena, A., Berrón, R., De la Torre, O., Del Valle, E., García, F., López, O., Martínez, E., Miranda, E., Pavón, V. M. y Tejeda, J. (1997), "Capítulo 10: Estructuras de mampostería y adobe", *El macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995*, Arturo Tena Colunga, editor, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica y Universidad de Colima, primera edición, octubre, ISBN 968-6190-83-X, pp. 233-267.
2. Blondet, M., García, M. y Brzev, S. (2003). Construcciones de adobe resistentes a los terremotos: Tutor. *Enciclopedia Mundial de Vivienda del EERI/IAEE*.
3. Burguete, E. y Estrada. V. (2017), "Revisión estructural de un edificio irregular de acero", *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, marzo.
4. ERN (2017). Reporte: daños por el sismo de M8.2 del 7 de septiembre, 2017.
5. Esteva, L. (1970), "Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería", *Ingeniería Sísmica*, 2, 1-33.
6. Flores, L. (2008). *Curso: Rehabilitación de estructuras de mampostería*. Oaxaca, Oaxaca, 11 y 12 de julio.
7. Fundación ICA (1988), *Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985*, primera edición, Limusa, ISBN 968-18 2939-5.
8. Godínez, E.A. y Tena, A. (2016), "Redundancy factors for the seismic design of ductile reinforced concrete chevron braced frames", *Latin American Journal of Solids and Structures*, **13**, 2088-2112.
9. González, R., Mora, J., y Aguirre, J. (2013). *Microzonificación sísmica de Tuxtla Gutiérrez*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
10. González, R., Mora, J., Aguirre, J., Aguilar, C., y Narcía, C. (2014). Análisis de los daños históricos por sismo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Memorias, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
11. Guevara, T. (2009), *Arquitectura moderna en zonas sísmicas*, primera edición, Editorial Gustavo Gili, SL, Barcelona, España, ISBN: 978-84-252-2292-4.

12. Hernández, D. A. y Tena, A. (2016), "Estudio paramétrico de modelos representativos de estructuras propensas a desarrollar pisos suaves o débiles ante excitaciones sísmicas de suelo blando", *Revista de Ingeniería Sísmica*, **95**, 53-80, https://doi.org/10.18867/ris.95.405.

13. Instituto de Ingeniería-UNAM (2017). *Reporte preliminar*. Parámetros del movimiento del suelo, sismo de Tehuantepec (M_W 8.2), 7 de septiembre de 2017.

14. Juárez, H., Gómez, A., Terán, A., Sordo, E., Arellano, E., Corona, M., Perea, T., Hernández, D., Rangel, G., Arzate, G., Ramírez H. y Jara, M. (1999), "Intensidades y daños asociados al sismo del 15 de junio de 1999", *Memorias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Morelia, Michoacán, **II**, 754-765, noviembre.

15. Juárez, H., Gómez, A., Rangel, J.L., Tena, A., y Pelcastre, E. (2012), "Reconocimiento geotécnico y estructural de la zona epicentral y ciudades afectadas por el sismo del 20 de Marzo de 2012", *Memorias, XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Cancún, Quintana Roo.

16. Juárez, H., Gómez, A., Rangel, J.L., Tena, A., Pelcastre, E., y Roldán, J. N. (2012), "El sismo de Ometepec, Guerrero, del 20 de marzo. *Memorias", XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Acapulco, Guerrero.

17. Ko, D. y Lee, H. (2006), "Shaking table test son a high-rise RC building model having torsional eccentricity in soft lower storeys", *Wiley InterScience*.

18. MOC-93 (1993). *Manual de diseño de obras civiles*. Diseño por sismo. Comisión Federal de Electricidad, Octubre.

19. MOC-08 (2009). *Manual de diseño de obras civiles*. Diseño por sismo. Comisión Federal de Electricidad, Noviembre.

20. MOC-15 (2015). *Manual de diseño de obras civiles*. Diseño por sismo. Comisión Federal de Electricidad.

21. Moehle, J. P. y Sozen, M. A. (1980), "Experiments to study earthquake response of R/C structures with stiffness interruptions", *Structural Research Series No. 482,* Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, August.

22. Montero, I.N. (2010), "Modelo neuronal artificial para estimar la aceleración máxima del terreno producida por sismos en el estado de Oaxaca", *Tesis de licenciatura*, Universidad Nacional Autónoma de México.

23. NTCM-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, octubre.

24. Núñez, F. y Ponce, L. (1989), "Zonas sísmicas de Oaxaca, México: sismos máximos y tiempos de recurrencia para el periodo 1542-1988", *Geofísica Internacional*, **28 (4)**.

25. Rangel, J. L., Tena, A. y Gómez, A. (2011), "Comportamiento observado en estructuras y subsuelo del valle y ciudad de Mexicali durante el sismo El Mayor-Cucupah del 4 de abril del 2010", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **16 (1)**, 39-67.
26. Reyes, C., Flores, L., Alcocer, S. M., Cuenca, J., Durán, R., Echavarría, A., Juárez, H., Lang, A., López, O., Martín del Campo, R., Pacheco, M. A. y Tejeda, J. (2006), "Capítulo 6. Vivienda", *El Sismo de Tecomán, México del 21 de enero de 2003*, Sergio M. Alcocer y Richard E. Klingner, Editores, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica y Earthquake Engineering Research Institute, primera edición, marzo, ISBN 1-932884-0-2, pp. 117-200.
27. Ruiz, A. y Aguilar, J. (2006), "Caracterización geométrica y mecánica de piezas de ladrillo de barro rojo recocido de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas", *Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puerto Vallarta, Jalisco.
28. SSN (2017). *Reporte especial*. Sismo de Tehuantepec (2017-09-07 23:49 MW 8.2).
29. Sordo, E., Gómez-Bernal, A., Juárez García, H., Gama, A., Guinto, E.R., Whitney, R. A., Vera, R., Mendoza, E. y Alonso, G. (1995), "The September 14, 1995 Ometepec, México, Earthquake, Learning from Earthquakes", *EERI Special Earthquake Report*, December.
30. Tena-Colunga, A. y Abrams, D. P. (1995), "Simplified 3-D dynamic analysis of structures with flexible diaphragms", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **24** (2), 221-232.
31. Tena-Colunga, A. y Abrams, D. P. (1996), "Seismic behavior of structures with flexible diaphragms", *ASCE Journal of Structural Engineering*, **122** (4), 439-445.
32. Tena, A. (2004), "Enseñanzas principales durante sismos recientes", *Memorias, II Seminario de Reaseguro Facultativo "Terremoto y Huracán"*, México, D. F, 51-87, septiembre.
33. Tena, A. (2010), "Irregularidad estructural y su efecto en la respuesta sísmica de edificios", *Memorias, V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Civil en honor del Dr. José Grases, Mérida, Venezuela*, CD-ROM, 1-57, noviembre.
34. Tena, A. (2011), "Capítulo 1. Los otros sismos del año 1995. Enseñanzas principales del macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995", *El Sismo de Villaflores, Chiapas, sus Realidades y Consecuencias*, Raúl González Herrera, Coordinador, Colección Jaguar, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, ISBN 978-607-7510-72-7, 19-83.
35. Tena, A. y Cortés, J.A. (2014), "Impacto de la redundancia estructural en el comportamiento sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **19 (1)**, 1-34.
36. Tena, A., Martínez, J. y Gómez, A. (2014), "Comportamiento de la vivienda en México durante el sismo El Mayor-Cucupah del 4 de abril

del 2010”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, **14 (1-2)**, 127-148.

37. Varum, H., Tarque, N., Silveira, D., Camata, G., Lobo, B., Blondet, M., Figueiredo, A., Masood Rafi, M., Oliveira, C y Costa, A. (2014), “ Structural Behaviour and Retrofitting of Adobe Masonry Buildings”, *In Structural Rehabilitation of Old Buildings, Building Pathology and Rehabilitation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 37-75